

고속철도 차량의 스커트 장착에 의한 실내·외 소음 영향 분석

The Noise Effect of a Skirt on Rolling-stock

김태민* · 김정태* · 김정수*

Tae Min Kim, Jeung Tae Kim and Jung Soo Kim

Key Words : High Speed Train(고속철도), Skirt(스커트), Exterior Noise(환경 소음), Interior Noise(실내 소음), Ray Method(광음향기법), Statical Energy Analysis(통계적 에너지 해석기법)

ABSTRACT

The high-speed train enjoys widespread acceptance as environment-friendly means of medium- to long-distance transportation. The pursuit of higher speed and lighter weight in railroad vehicles has engendered higher noise level. In particular, the environmental noise places many restrictions in the operation of high-speed railroad vehicles. This research investigates the effect of installing a skirt onto a high-speed train bogie with the top speed of 400 km/hr and using High Speed EMU for the purpose of reducing the environmental noise. In order to analyze the effect of the interior noise and environmental noise due to installation of the skirt, sound level is calculated using the Ray method and Statical Energy Analysis method. The numerical calculation predicts a reduction of approximately 2 dB in the environmental noise level, but at the cost of increase of approximately 2.5 dB in the interior noise level of the vehicle.

1. 서 론

고속철도는 친환경 교통수단으로서 현대 시대에 화물 및 고객 운송에 있어 가장 중요한 교통수단으로서 자리 잡고 있다. 하지만 고속철도는 고속화·경량화를 목적으로 연구되고 있으며, 이에 따른 고속철도 차량의 실내 및 환경 소음은 크게 증가할 것으로 예상된다.

현재 고속철도 차량은 최고 속도 400 km/hr를 목표로 연구되고 있으며, 이에 따른 공력 소음 증가 문제는 크게 대두되고 있다. 고속철도 주행 속도가 증가하면 열차 차간 공간 및 보기에서 속도에 민감한 공력소음이 크게 증가하게 된다. 현재 연구 결과로는 차간 공간의 공력 소음은 속도의 6승이 비례하여 증가하는 것으로 알려져 있다.^[1] 또한 경량화 취지로 고속철도 차량의 구조가 철에서 알루미늄으로 변경되었기 때문에 질량법칙에 따른 구조물의 차음 성능은 떨어지게 된다. 질량 법칙이란 질량이 무거울수록, 주파수가 올라갈수록 차음 성능이 증가됨을

얘기하며, 가벼워진 고속철도 구조물에 의해 차량 실내 소음은 증가하게 된다.

현재 개발 중인 차량은 동력 분산형 차량으로, 기존의 집중식 차량과는 소음특성이 매우 상이하다. 기존 동력 집중식 차량의 경우 동력원이 선두 차량과 선미 차량에 위치하여 열차를 끄는 형태로 설계된 반면, 동력 분산형 고속철도 차량은 열차의 동력원이 각 차량에 배치되어 있어 고속화 취지에는 긍정적인 반면 소음측면에서 부정적인 영향을 끼칠 것으로 예상된다.

고속철도 차량의 주행에 따른 차량 실내 및 환경 소음을 줄이기 위하여 많은 연구가 진행 중에 있으며 고속철도 차량의 환경 소음 저감 측면에서 열차 보기에 스커트(Skirt), 차간 공간에 커버를 장착하여 공력 소음을 저감 시키고자 한다.^[2] 열차 차간 공간에서 발생하는 공력 소음의 경우 차간 공간 커버를 통하여 저감시킬 수 있으며, 환경 소음뿐만 아니라 실내 소음 저감에도 긍정적인 영향이 있다. 하지만 스커트의 경우 환경 소음 측면에서는 보기에서 발생

되는 소음 전파를 차단하므로 긍정적인 측면이 있는 반면, 실내 소음측면에서는 외부로 전파되지 못한 소음이 차량 하부를 통해 실내로 침투할 수 있으므로 양면적인 영향을 고려할 수 있다.

본 연구에서는 고속철도 차량의 환경 소음을 저감 시키고자 고안된 스커트의 효과에 대하여 연구하였다. 스커트 장착에 따른 고속철도 차량의 환경 소음 저감 효과와 더불어 실내 소음에 미치는 영향을 광음향기법(Ray Method)과 통계적 에너지 해석 기법(Statical Energy Analysis : SEA)을 통하여 연구하였다. 광음향기법이란 소리를 빛으로 가정하여 음을 발생 시키고, 재료의 흡음률에 대하여 음을 감소시킴과 동시에 반사 시켜 음의 전파를 해석하는 방법을 말하며,^[3] 통계적 에너지 해석 기법(SEA)은 공간에서의 음을 에너지 평균하여 전달 과정에서의 loss factor를 통해 음의 전파를 해석 하는 기법을 말한다.^[4] 환경 소음 예측은 실제 환경 소음 측정 시 고려되는 ISO 3095와 동일하게 열차로부터 수직 25 m 떨어진 지점에서 1.5 m 높이에서의 소음도를 예측하였다. 실내 소음도 실제 측정 시 반영되는 ISO 3381에 따라 열차 중앙에서 소음도를 예측하였다. 즉, 스커트 장착에 따른 고속철도 차량의 실내 및 환경 소음 영향을 해석적으로 예측하고 그 영향에 대하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 동력 분산형 고속철도 차량의 소음원

(1) 공력 소음

고속철도 주행 시 발생하는 공력소음은 크게 관토 및 관련구조, 보기 및 차량 간극 소음, 차량 유동소음 경계층으로 나눌 수 있다. 이와 같은 다양한 공력 소음원의 특성은 주행속도, 설계방식, 구조물의 표면 재료 등의 구성에 따라, 발생하는 소음도와 주파수 대역이 각각 상이하게 나타난다. 특히, 속도가 250 km/hr를 넘게 되면 차체공력 소음의 크기가 증가한다. 이는 철도변에서 측정되는 소음 중 공력소음의 영향이 지배적이게 되며, 저주파 대역(100 ~ 800 Hz)에서 공력 소음이 광대역으로 나타나게 된다. 표 1은 보기와 간극에서의 소음 특성을 나타낸다.

Table 1 Noise Property of Bogie and Inter-Coach Space

소음원	발생 특성
보기	- 500 ~ 1000 Hz 방사 소음 - 1000 Hz 소음 발생
간극	- 500 Hz 이하 방사 소음 - 순음 발생

본 연구에서는 기존에 수행된 연구 결과를 통하여, 고속철도 모델 구축 시 보기와 간극의 소음원 모델에 활용 하였다.^[2,5] 선행 연구에서 소음원은 실제 측정 데이터를 활용하여 주행 속도 350 km/hr로 환산하여 각 파트에서 3점 음원으로 제시하였고 소음 예측을 위하여 음원 위치별 total acoustic power와 음원의 SPL 값을 이용하여 음원별 acoustic power level을 산출하였다. 그림 1은 보기와 간극에서의 3점 음원에 대한 위치를 나타내었다.^[2]

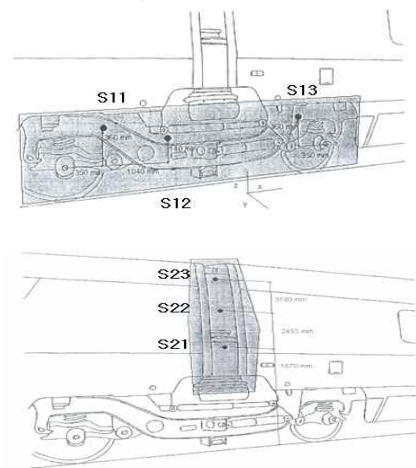


Figure 1 3-Point Noise Sources of Bogie and Gap

각 음원의 acoustic power 산출 식은 다음과 같다.

$$\text{Power} = \text{total acoustic power level} - 10\log[a/b]$$

a = 기준 SPL 대비 각 지점별 소음 크기 비의 합
b = 기준 SPL 대비 각 지점의 소음 크기 비

(2) 차륜-레일의 소음

차륜-레일 소음은 차륜과 레일의 접촉 상호 작용에 의해 발생하는 소음으로, 차륜이 레일을 주행하면서 레일표면의 불규칙한 거칠기에 의해서 가진력

이 발생하며, 차륜, 레일 및 침목 등에서 발생하는 진동이 소음으로 전파된다.

본 연구에서는 기존 300 km/hr로 주행하는 열차의 SPL 측정 자료를 토대로 하여 350 km/hr로 주행 시 차륜-레일 소음원으로 환산하여 사용 하였다.

(3) 소음원 모델링

고속철도 차량의 소음원으로 보기와 간극의 공력 소음과 차륜 레일 소음을 모델링하였다. 판토크래프(Pantograph) 소음은 스킵트 효과와는 무관하고, 승객이 탑승하는 열차에는 장착되지 않아 영향이 미비할 것으로 예상 되므로 제외하여 모델링 하였다. 선행 연구에서 차량과 차량 사이 간극에 대하여 3점 음원으로 배치하여 사용하였으나 본 연구에서는 이를 증가시켜 하나의 점음원으로 모델링 하였다.^[2,5] 그림 2는 광음향 기법을 위한 고속철도 차량의 소음원을 나타낸다.



Figure 2 Noise source of High Speed Train at the Bogie and Inter-Coach Space

차륜과 레일 사이에서 발생하는 기계기인 소음원은 선행 연구와 동일하게 각 보기 부분에 증가 된 음원을 각각 1개씩 점음원으로 배치하였다.

표 2는 동력 분산형 고속 철도 차량의 350 km/hr 주행을 가정한 각 음원의 옥타브 별 음향 파워를 나타낸다. 표에서 알 수 있듯이 고속철도 차량은 주행 시 차륜-레일에서 발생하는 기계기인 소음에 비해 공력소음이 약 10배 큰 것을 확인 할 수 있다. 또한 공력 소음에서도 차간 공간에 비해 보기에서 발생되는 공력 소음이 더 큰 것을 확인 할 수 있다.

Table 2 Sound Power Level of Each Point Source

Frequency [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
Bogie	112.4	109.5	107.9	106.3	106.6	104.2
Inter-coach Space	98.3	95.3	93.6	92.3	89.3	88.3
Rolling Noise	110.2	107.9	107.9	103.4	110.4	77.7

2.2 동력 분산형 고속철도 차량 모델링

고속철도 차량에 대한 차량 실내 소음 및 환경소음에 대한 전산 해석을 위하여 고속철도 차량의 객차를 3D 모델링 상용프로그램인 UGS NX 를 이용하여 모델링 하였다. 본 연구에서는 동력 분산형 고속철도 차량을 대상으로 연구를 진행하였으며 동력 분산형 차량은 두 개의 대차 위에 하나의 객차가 위치하는 형태로, 기존의 동력 집중식 모델에 비하여 차체의 길이와 높이, 폭이 늘어난 점이 특징이다. 그림 3은 CAD 프로그램에서 제작된 2량 1편성의 동력 분산형 고속철도 차량을 보여준다.

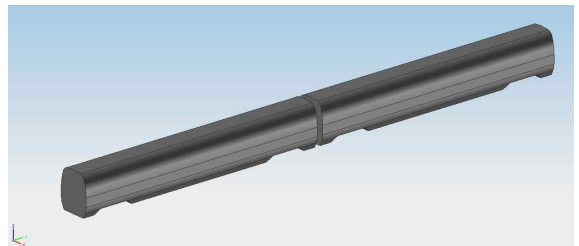


Figure 3 Modeling of High Speed Train

본 연구에서는 스킵트 장착에 따른 환경 소음 영향을 분석하기 위한 수단으로서 광음향 기법을 사용하였다. 그림 4는 광음향기법 상용 소프트웨어인 RAYNOISE에서 모델링 된 동력 분산형 고속철도 차량을 보여준다.

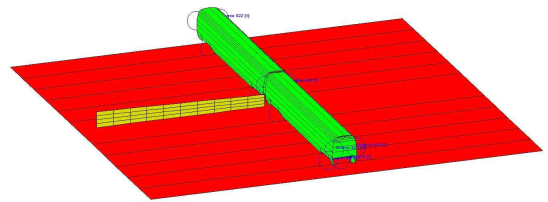


Figure 4 RAYNOISE Modeling of High Speed Train

그림에서 볼 수 있듯이 2량 1편성으로 모델링하였으며 고속철도 차량의 소음원을 구현하기 위하여 대차 및 차간 공간에 점음원으로 가정한 소음원을 모델링하였다. 또한 스킵트 장착 효과를 실제 측정 방법과 동일시키기 위하여 해당 위치에 field point mesh를 수행하였다.

고속철도 차량의 실내 소음은 통계적 에너지 해석

기법 상용소프트웨어인 VA ONE을 사용하여 예측하였다. 실내 소음 예측 시 고속철도 1량에 대하여 모델링하였으며, 환경 소음 예측 시 열차 표면 소음을 해석하여 VA ONE 해석 시 소음원으로 모델링하여 열차 실내로 음이 투과 되도록 설계하였다.⁶⁾ 그림 5는 VA ONE에서 모델링된 동력 분산형 고속철도 차량을 보여준다.

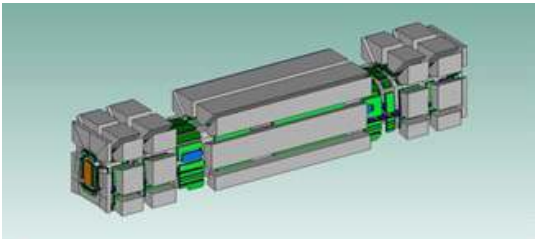


Figure 5 Modeling of High Speed Train in VA ONE

2.3 실내 · 외 소음 예측 결과

(1) 기존 고속철도 차량의 소음도 예측 결과

그림 6은 광음향기법을 이용한 동력 분산형 고속철도 차량의 환경 소음 예측 결과를 보여준다. 붉게 표시된 부분이 높은 소음도를 나타내며 파랑 부분이 적은 소음도를 나타낸다. 환경 소음은 열차에서 멀어질수록 소음도가 감소하는 것을 볼 수 있다.

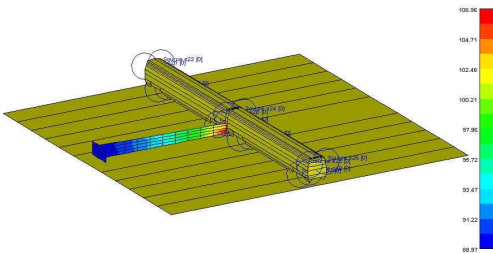


Figure 6 Result of Exterior Noise without Skirt

그림에서 볼 수 있듯이 스킨트를 장착하지 않았을 경우 25 m 떨어진 지점에서 89 dB (85 dBA) 소음도가 예측되었다. 환경 소음 측정 지점의 주파수 별 소음도는 표 3과 같다.

Table 3 Exterior Noise without Skirt

Frequency [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
SPL [dB]	85.0	82.1	80.5	78.9	79.1	76.7
SPL [dBA]	68.9	73.5	77.3	78.9	80.3	77.7

350 km/hr로 주행하는 경우 환경소음은 약 89 dB로 예측 되었으며 공력 소음의 영향이 지배적인 것으로 판단된다.

그림 7은 기존 고속철도 차량의 실내 소음 예측 결과를 보여준다. 스킨트가 장착되지 않은 고속철도 차량의 경우 약 70 dBA의 실내 소음도 갖는 것으로 예측되었다.

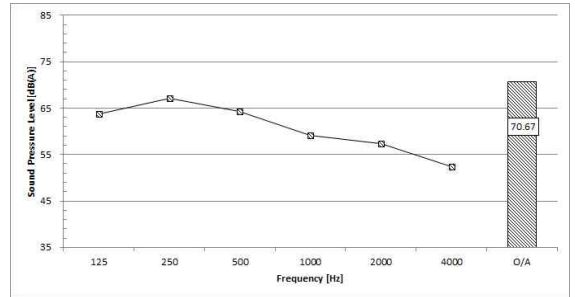


Figure 7 Result of Interior Noise without Skirt

(2) 스킨트 장착 차량의 소음도 예측

그림 8은 스킨트를 장착한 동력 분산형 고속철도 차량의 환경 소음 예측 결과를 보여준다. 스킨트는 고속철도 차량의 보기 부분에 0.6 m 길이의 스킨트를 장착하여 예측하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 스킨트를 장착하지 않은 그림 6과는 환경소음 예측 결과가 다른 것을 확인 할 수 있다. 스킨트 장착 후 더 적은 소음도가 분포되고 있음을 확인 할 수 있다.

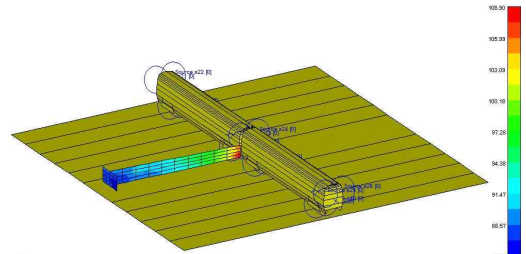


Figure 8 Result of Exterior Noise with Skirt

스킨트를 장착한 고속철도 차량의 환경 소음의 경우 약 87 dB (83 dBA) 소음도가 예측되었다. 환경 소음 측정 지점의 주파수별 소음도는 표 4와 같다.

Table 4 Exterior Noise with Skirt

Frequency [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000
SPL [dB]	83.1	80.2	78.5	76.9	77.1	74.6
SPL [dBA]	67.0	71.6	75.3	76.9	78.3	75.6

그림 9는 기존 고속철도 차량의 실내 소음 예측 결과를 보여준다. 스커트가 장착 된 고속철도 차량의 경우 약 72 dBA의 실내 소음도 갖는 것으로 예측되었다.

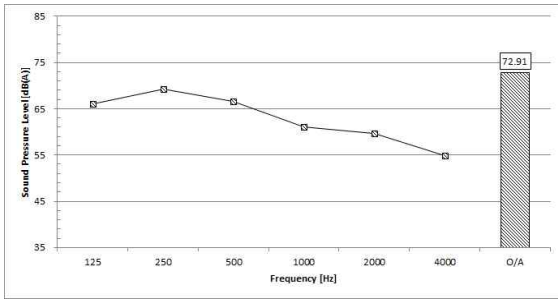


Figure 9 Result of Interior Noise with Skirt

2.4 스커트 장착에 따른 소음도 영향 분석

(1) 고속철도 차량의 환경 소음

스커트 장착에 따른 고속철도 차량의 환경 소음 영향은 약 2 dB 줄어든 것을 확인 할 수 있다. 개활지 기준 스커트 장착 전 환경 소음 예측 결과는 89 dB인 반면 스커트를 장착하면 약 87 dB로 2 dB 소음 저감 효과가 있는 것으로 분석되었다. 이는 소음 원은 전파를 스커트가 차단하여 환경 소음을 크게 줄인 것으로 판단된다. 즉, 스커트가 보기에서 발생되는 소음의 측정 위치까지의 직선음을 줄여 주기 때문에 이와 같은 효과가 발생된 것으로 판단된다. 표 5는 스커트 장착에 따른 환경 소음 변화를 보여준다.

Table 5 Comparison of Exterior Noise (Skirt Effect)

Frequency [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	O/A
장착 전	85.0	82.1	80.5	78.9	79.1	76.7	89
장착 후	83.1	80.2	78.5	76.9	77.1	74.6	87
차이	1.9	1.9	2	2	2	2.1	2

그림 10은 보기에서 발생되는 소음의 전파 과정을

보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 스커트가 측정 지점까지의 직선파와 지표면에 반사되어 전달되는 음을 차단시켜 최소한의 반사파만을 전달시키게 한다. 따라서 스커트를 장착할 경우 고속철도 차량의 환경 소음을 줄여 주는 것을 확인 할 수 있다.

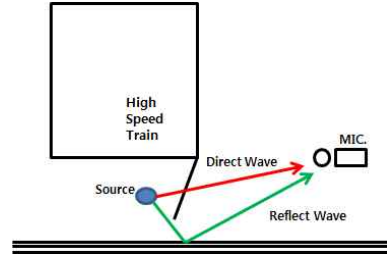


Figure 10 Propagation of bogie Noise

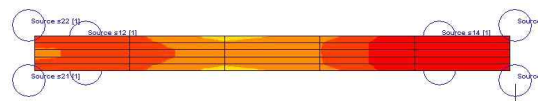
(2) 고속철도 차량의 실내 소음

스커트 장착에 따른 고속철도 차량의 실내 소음의 경우 환경 소음과는 반대로 증가한 것을 볼 수 있다. 스커트 장착 전 실내 소음은 약 70 dBA인 반면 스커트를 장착 한 차량의 경우 약 72 dBA로 실내 소음도가 증가 한 것을 확인 할 수 있다. 이는 외부 방출되지 못한 차륜레일의 소음과 보기의 소음이 차량 하부에 분포하게 되어 실내로 유입된 것으로 판단된다. 표 6은 열차 하부의 소음도를 보여준다. 표에서 볼 수 있듯이 스커트를 장착 하였을 경우 열차 하부에 분포하는 소음도가 약 2.5 dB 증가한 것을 확인 할 수 있다.

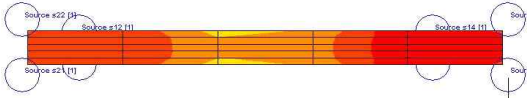
Table 6 Comparison of Exterior Noise (Skirt Effect)

Frequency [Hz]	125	250	500	1k	2k	4k	O/A
장착 전	106.5	103.6	101.9	100.3	100.5	98.0	110.5
장착 후	109.0	106.1	104.4	102.8	103.0	100.5	113.0

그림 11은 열차 하부의 소음 분포도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 소음이 분포하는 경향은 비슷하나, 붉은 색으로 표기된, 방출되지 못한 소음이 열차 하부에 더 많이 분포하는 것을 확인 할 수 있다.



a) Without Skirt



b) With Skirt

Figure 11 Effect of Skirt at Underneath Train

3. 결 론

본 연구에서는 최고속도 400 km/hr를 목표로 연구 중인 동력 분산형 고속철도 차량의 환경 소음 저감연구의 일환으로서 스커트 장착에 따른 영향을 해석적으로 분석하였다. 고속철도 차량의 환경 소음 예측을 위하여 광음향 기법을 사용하였으며 실내 소음 예측을 위해 통계적 에너지 해석 기법을 사용하여 스커트 장착에 따른 효과를 해석적으로 분석하였다. 스커트 장착에 따른 고속철도 차량의 환경소음은 장착 전후 대비 약 2 dB 소음 저감 효과가 있는 것으로 예측되었다. 하지만 실내 소음의 경우 환경 소음 결과와는 반대로 약 2.5 dB 증가하는 것으로 예측되었다. 즉, 환경 소음 저감을 위해, 보기 부분에서 발생하는 공력 소음을 차단하는 방법은 환경 소음 측면에서는 긍정적인 영향이 있지만 실내 소음 측면에서는 부정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이는 환경소음은 저감시켰지만, 외부로 방출되지 못한 소음이 객실로 유입되어 실내 소음을 증가시킨 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 미래철도 기술개발 사업의 차세대 고속철도 기술개발 과제(실내·외 소음저감 기술)로 수행된 연구 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, T. M., Kim, J. S., 2011, Analysis of Aerodynamic Noise in High Speed Trains, Proceedings of the International Journal of Railway, pp. 70~73.
- (2) Hong, Y. H., Kim, J. T., Kim, J. S., 2009, High-Speed EMU : Exterior and Environment Noise prediction and Reduction, Proceedings of the KSNVE Annual fall Conference, pp. 198.
- (3) RAYNOISE 3.1 User's manual
- (4) VA ONE 2009 User's Guide, Theory & QA
- (5) Pallas, M. A., Schmitz, K. P., Barsikow, B., 1994, DEUFRAKO : Localized Sound Sources on the High Speed Vehicles ICE, TGV-A and TR07, pp. 377~383
- (6) Kim, T. M., Kim, J. T., 2011, Analysis of Interior Noise Reduction in High Speed Trains by Filling up with Form, Proceedings of the Korea Society for Railway Annual fall Conference, pp. 663~669.